

# 委員会報告 コンクリートセクターにおける地球温暖化物質・廃棄物の最小化に関する研究委員会

堺 孝司\*1・野口 貴文\*2・大脇 英司\*3・河合 研至\*4・小山 明男\*5

**要旨:** 日本全体および地域ごとのコンクリートに関わるマテリアルフローならびに材料・産業ごとのマテリアルフローの実態を明らかにするとともに、一般に公表・利用されているインベントリデータの収集およびアンケート調査によるインベントリデータの算出を行った。また、ライフサイクルの各段階における CO<sub>2</sub> 削減技術となる要素技術の抽出とその技術の適用による CO<sub>2</sub> 削減量の推定を行うとともに、諸課題の洗い出しを行った。最後に、コンクリートセクターが低炭素・完全資源循環を目指すための提言を行った。

**キーワード:** コンクリート, 地球温暖化物質, 廃棄物, マテリアルフロー, インベントリ, 提言

## 1. はじめに

地球温暖化問題は、世界の政治課題としてその解決に向けた様々な動きが急である。すべての産業は、今後その生産活動に伴う地球温暖化ガスの一層の削減を図ることが求められることは明らかである。コンクリートセクターでは、膨大な資源・エネルギーが消費されている。世界のセメント生産は約 28 億トン、コンクリート生産は 150 億トンを遙かに上回ると考えられる。施工や輸送に関わるエネルギーも少なくない。将来、これらが数倍に膨れあがることが予測されている。地球に最も潤沢に存在する資源から製造されるコンクリートに代わる建設資材は存在しないことから、今後、コンクリートセクターはコンクリートの利用及びその解体等におけるドラスティックな環境負荷低減を図る必要に迫られることになると思われる。

本研究委員会は、このような状況を考慮し、コンクリートセクターとしての地球温暖化物質と廃棄物の最小化による環境負荷低減についてあらゆる観点から検討することを目的として設置された。本研究委員会は、H19 年度に終了した JCI-TC-055FS「コンクリート構造物の環境性能に関する研究委員会」の発展的活動であり、コンクリートセクターから排出される地球温暖化物質と廃棄物を最小化するための要素技術・総合技術システム・社会制度等について広範囲に検討してきた。具体的には、日本全体および地域ごとのマテリアルフローならびに材料・産業ごとのマテリアルおよび物質のフローの実態を明らかにするために、コンクリートセクター関連する各協会・団体を通じた資料収集と全国レベルのアンケート調査を行った。また、一般に公表・利用されているイ

ンベントリデータの収集、それらのデータの算出方法の調査を行うとともに、収集したデータに基づくインベントリについて影響要因の分析を行った。更に、ライフサイクルの各段階において CO<sub>2</sub> 削減技術となる要素技術の抽出とその技術の適用による CO<sub>2</sub> 削減量の推定を行うとともに、その技術の有する技術的課題、経済的課題、社会的課題の洗い出しを行った。最後に、本研究委員会により行った調査・研究に基づいて、コンクリートセクターが低炭素・完全資源循環を目指すための提言を行った。

表-1 に、本研究委員会の委員構成を示す。

表-1 委員会構成

<b>委員長</b>	堺孝司			
<b>幹事</b>	野口貴文	河合研至	小山明男	大脇英司
<b>物質フローWG</b>				
主査	野口貴文			
委員	伊藤康司	岩崎信治	紙田晋	河村光昭
	北垣克馬	仁田英夫	橋本好市	高橋茂
	橋本征二	溝口孝義	堺孝司	
<b>インベントリ WG</b>				
主査	大脇英司			
委員	天野正喜	石川嘉崇	井元晴丈	片平博
	小西正芳	曾根真理	堺孝司	
<b>ポートフォリオ WG</b>				
主査	河合研至			
委員	上野敦	兼松学	黒田泰弘	手塚正道
	道正泰弘	松家武樹	村田裕志	堺孝司
<b>社会システム WG</b>				
主査	小山明男			
委員	有川智	加藤佳孝	川西泰一郎	竹田宣典
	田村雅紀	間宮尚	丸山一平	柳橋邦生
	堺孝司			

\*1 香川大学 工学部安全システム建設工学科 教授 工博 (正会員)

\*2 東京大学 大学院工学系研究科建築学専攻 准教授 博士 (工学) (正会員)

\*3 大成建設 (株) 技術センター土木技術研究所 博士 (工学) (正会員)

\*4 広島大学 大学院工学研究院社会環境空間部門 教授 工博 (正会員)

\*5 明治大学 理工学部建築学科 教授 博士 (工学) (正会員)

## 2. コンクリートのマテリアルフロー

### 2.1 マテリアルフロー把握の意義

日本をはじめとする先進工業国は、大量の天然資源を採取し、様々な製品やサービスを生産・消費することによって便利で豊かな生活を享受している。一方、そうした製品やサービスの生産・消費に伴って大量の廃ガス・廃液・廃固形物が発生し、これらを気圏・水圏・地圏などの自然環境に戻している。様々な環境問題は、基本的にはこのような大量のマテリアルフローが、自然環境のもつ資源の再生能力や廃棄物の浄化能力を大きく超えてしまったことに起因している。過度の森林伐採によって引き起こされる森林減少や生物多様性の減少、大量の二酸化炭素等の排出によって引き起こされる気候変動などは、人間活動に伴う大量のマテリアルフローが引き起こした地球規模の環境問題の典型例である。

コンクリートは、水に次いで使用量が多い物質であり、資源消費の面からだけでなく、将来の廃棄物発生のみならず、循環型社会の構築に甚大な影響を及ぼす物質であることは間違いない。2006年度における日本のマテリアルフローを図-1<sup>1)</sup>に示すが、18.2億トンの総物質投入量の約1/2の7.5億トンが土木構造物や建築物などの形で蓄積されていることがわかり、生コンクリートの2006年度における年間生産量が118,981,736m<sup>3</sup>(約2.73億トン)であることから、日本の総物質投入量の15%程度がコンクリートに投入されていることがわかる。我が国では5.8億トンの廃棄物等が発生しているが、循環利用されているのは2.3億トンであり、これは、総物質投入量のわずか12.5%に過ぎない。建設廃棄物に関しては、2005年度に7,700万トンが発生し、コンクリート塊はその40%を占めているが、他の材料・製品と同様に資源投入量に比して廃棄物発生量は低い水準にある。しかしながら、近い将来、大量のコンクリート塊が廃棄物として発生することが予想されるため、コンクリート塊の路盤材以外の有効利用方策を探ることは重要である。

大量のマテリアルフローに特徴づけられた今日の人間社会と環境問題の関わりを分析する上では、自然環境と人間社会の間、および人間社会における様々な主体間のマテリアルフローを把握し分析することが不可欠である。コンクリートセクターにおけるマテリアルフローの上流側については、大量の岩石の採取による土地改変等への対応、下流側については、相対的に大量の廃棄物と地球温暖化ガスを排出していることへの対応、また、上流と下流をつなぐものとして他産業も含めた物質循環におけるコンクリートセクターの役割など、未来を見据えて検討すべき課題は多い。こうした検討のベースとなるのがマテリアルフローの把握である。

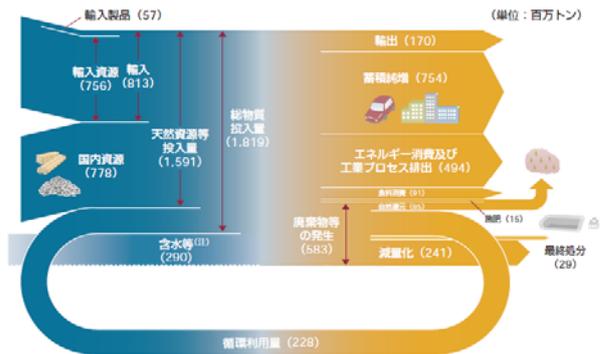


図-1 日本のマテリアルフロー (2006年度)<sup>1)</sup>

### 2.2 各種材料・製品のマテリアルフロー

#### (1) 調査の目的・方法

コンクリートおよびコンクリート構造物に関わるマテリアルフローの現状(下記の①～③)を明らかにするとともに、将来のマテリアルフローのあるべき姿とそのための課題を示すことを目的として、文献調査および関連諸団体へのヒアリング・アンケート調査を実施した。調査対象は、セメント、混和材(高炉スラグ微粉末、石炭灰)、化学混和剤、骨材(砕石・砕砂、砂利・砂、石灰石砕石・砕砂、スラグ骨材)、水、生コンクリート、鉄筋、型枠、コンクリート製品、コンクリート構造物(土木構造物、建築物)、および解体コンクリート塊である。

- ① 全国の年間での生産量・建設量・発生量の変遷(種類別, 用途別)
  - ② 地方単位(または都道府県単位)の年間での生産量・使用量・建設量・発生量の変遷(種類別, 用途別)
  - ③ 地方単位(または都道府県単位)の年単位での材料・製品・廃棄物の移入・移出の変遷
- ここでは、調査結果の一例を示す。

#### (2) 全国の生産量・建設量・発生量

高炉スラグの用途別販売量の推移を図-2<sup>2)</sup>に示す。高炉水砕スラグの主な販売先は、国内セメント用、輸出セメント用および細骨材であり、高炉徐冷スラグは、粗骨材および道路用路盤材が主な販売先である。高炉スラグ微粉末と国内セメント用を合計した販売比率は、1995年度は63.4%であったが、それ以降減少傾向にあるのに対し、輸出セメント用は1995年度以降増加傾向にある。

建築物の着工床面積の推移を図-3<sup>3)</sup>に示す。着工建築物の床面積の合計がピークだったのは1990年であり、2007年にはピーク時の57%程度にまで落ち込んでいる。なお、こうした着工床面積の減少は、2008年のリーマンショック後の景気低迷の影響もあり、今後も暫くは続くものと予想される。

プレストレスト・コンクリート構造物(PC構造物)の種類別建設量の推移を図-4<sup>4)</sup>に示す。土木構造物全般の

実績推移と大きな違いはなく、1999年がピークとなっている。2008年度にはピーク時の54%に落ち込み、今後さらに落ち込むことが予想されている。内訳は、道路橋上部工が全体の73%を占め、鉄道橋、その他橋梁も含めて橋梁の比率が高い。

(3) 地方単位での生産量・使用量・建設量・発生量  
一例として、石炭灰の発生量の地域分布を図-5に示す。石炭灰は北海道から沖縄まで広い地域において発生しているが、各地域の発生量と需要量の間には差があるため、需要地との距離によっては供給面の制約を受ける場合もある。特に、関東地区の発生量が他の地区と比べて相当少ないことがわかる。

(4) 地方単位での材料・製品・廃棄物の移入・移出  
一例として、セメントの地方単位での年間の生産量・販売量の推移の一例を図-6に示す。全体的な傾向として、都市が集中する地区にはセメントが移入しており、中国地区および九州地区からはセメントが移出してい

る。移出地区は、セメント工場が集中しており、工場も臨海または海に近い場所に立地しているため、船舶による大量輸送が可能である。2008年度の一次輸送における船舶による輸送割合は67.6%となっている。北海道・北陸・四国地区は、1975年および1985年は移出入が少なかったが、1995年以降は移出量が増加している。東北地区は、比較的移出入が少なく地産地消に近いといえる。

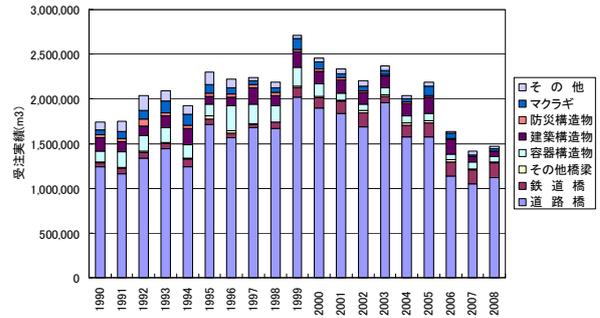


図-4 PC 構造物の受注量の推移<sup>4)</sup>

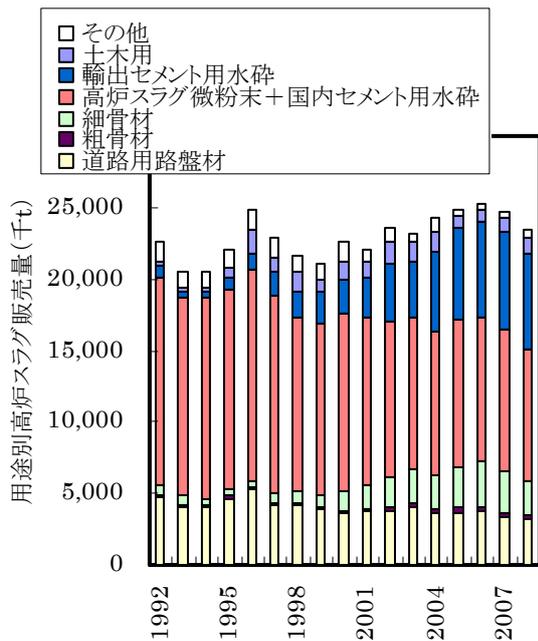


図-2 高炉スラグの用途別販売量の推移<sup>2)</sup>

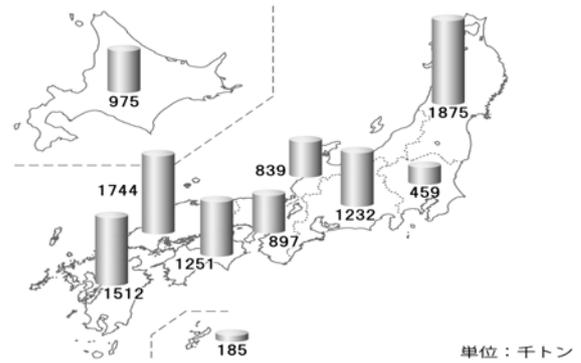


図-5 石炭灰の地域別発生量

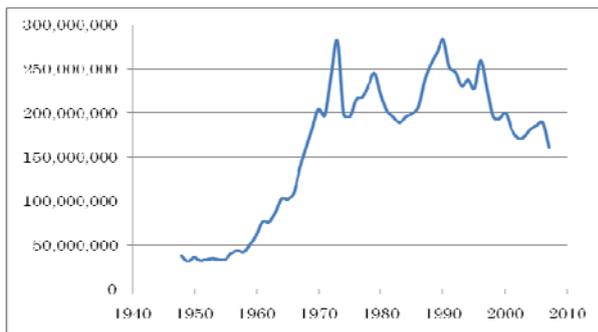


図-3 建築物の着工床面積の推移<sup>3)</sup>

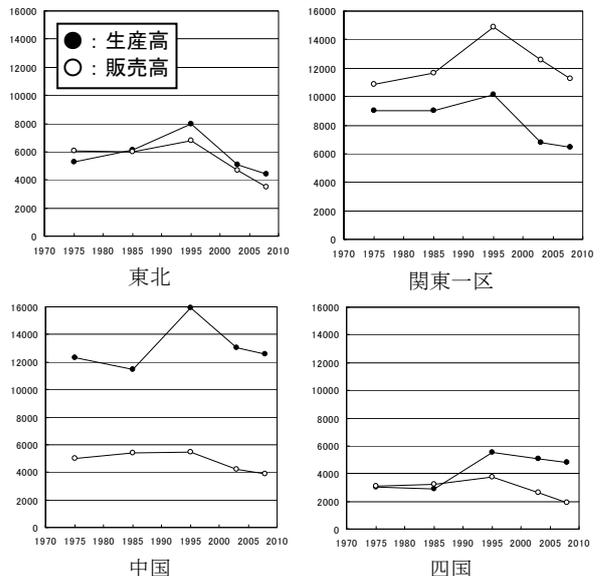


図-6 セメントの地方単位での生産量・販売量の推移

### 3. コンクリートセクターに関わるインベントリ

#### 3.1 インベントリデータの集積とその重要性

##### (1) インベントリデータの集積

コンクリートやコンクリート構造物に関わるインベントリデータについて、材料の製造から解体、再利用までのライフサイクルを対象に検討した。まず、公開、公表されているデータを収集し、その算出過程について確認した。計算に使用しているデータや計算方法、バウンダリーについて明らかになった場合には、それらの特徴をまとめ、特徴に起因する使用上の留意点などを指摘した。適切なインベントリデータが公表されていない場合には、その算出を試みた。また、前章に示したマテリアルフローの検討成果のうち、アンケート調査結果に基づきインベントリデータを算出した。これは経済統計から算出されるインベントリデータと比較して、作業工程や地域性などの実態をより反映しているものと思われる。

なお、本研究委員会の活動ではインベントリデータとして、主に CO<sub>2</sub> 排出原単位を対象とした。

##### (2) インベントリデータ的重要性

コンクリートセクターに関わるインベントリデータは、社会資本整備を行う際の環境影響評価などに利用されている。コンクリートセクターとの関わりが強い建設事業では、計画、設計、施工、維持管理、解体・廃棄の段階で適切なインベントリデータを用いて評価を行うことにより、環境影響を抑制できる事業計画、工種、材料・工法を選択することが可能になる。前述のようにコンクリートセクターに関連するマテリアルフローは膨大であるため、地球規模の環境負荷の抑制のために、インベントリデータの整備は重要なものとなっている。

インベントリデータはマテリアルフローを異なる観点からみたものであり、本質的には同一のものである。したがって、投入、生産、排出される物質やエネルギーについて漏れがないようにしなければならない。コンクリートセクターに関わるインベントリデータでは、資源やエネルギーの輸入、産業副産物の活用、廃棄物の再生などを取り扱う場合があり、他の関連するセクターとの間でバウンダリーが錯綜する場合もある。このため、それぞれのインベントリデータの持つ特徴を把握した上で、それぞれの評価に適用しなければならない。

#### 3.2 コンクリートやコンクリート構造物に用いる材料

##### (1) セメント

我が国ではセメント協会が公表する CO<sub>2</sub> 排出原単位が良く知られている。エネルギー効率の向上のための企業活動などが功奏し、他国で生産されるセメントと比較して排出原単位が小さい。しかしながら我が国では、廃棄物を熱原にした場合にはその CO<sub>2</sub> 排出量はセメント生産に加算しない、社外から購入する電力の発電に関わる

CO<sub>2</sub> 排出量は加算しない、などの特徴を持つため、使用に際してはこれらに留意する必要がある。

##### (2) 混和材

高炉水砕スラグについて、国内の生産者から公表された CO<sub>2</sub> 排出原単位はない。高炉水砕スラグは溶銑を生産する過程で発生する副産物を原料とし、粉碎、分級などを経て生産される。我が国ではスラグの生成に関するエネルギー消費や CO<sub>2</sub> の排出は鉄鋼生産に付加されている。粉碎等に関わるインベントリは高炉水砕スラグにて計上すべきであるが、その詳細は明らかではない。一方、海外を中心にスラグの発生に関わる CO<sub>2</sub> 排出等についても、スラグの利用者が負担すべきとの考え方もあり、インベントリを利用する際に注意が必要であるとともに今後の動向に注目する必要がある。

石炭灰はセメント原料やコンクリート用混和材として利用されている。高炉水砕スラグと同様に、石炭灰の発生に関わる環境負荷等は主製品である電力の生産にて考慮されている。したがって、石炭灰の使用に際しては分級と運搬に関わる負荷を考慮することになる。混和材として使用する場合には、セメント原料とする場合と比較して小口輸送となるため、エネルギー効率が低下する傾向にある。輸送手段、距離を適切に選択すればポルトランドセメントの使用量を抑制し、環境負荷の低減に効果を発揮することができる。

このほか、シリカフェームや石灰石微粉末の利用が進んでいるが、インベントリデータの整備は未成熟であり、今後の検討の進展が待たれる。

##### (3) 化学混和剤

化学混和剤の詳細な成分や製造工程は企業秘密であることが多く、インベントリデータも明らかではない。本研究委員会では化学混和剤協会へのアンケート調査により、CO<sub>2</sub> 原単位を算出した。回答から得られたデータには幅があるが、コンクリートの調(配)合に占める化学混和剤の単分量は小さいため、コンクリートセクターとして利用することは可能であると考えられる。

##### (4) 骨材

天然骨材について、最近の国内のマテリアルフローと一般的な製造工程から、河川や内陸で生産する場合と、海砂を生産する場合で分けて試算した。また、砕石・砕砂について、日本砕石協会の生産統計に基づいてインベントリデータを算出した。今後、試算の妥当性の検証を行い、他の公表事例等との相互確認を行い、インベントリを明らかにしていく必要がある。

再生骨材について、既往の文献調査によりインベントリデータをまとめた。再生材の品質が高くなると環境負荷が大きくなる傾向にある。また、生産規模により大きく相違する。再生材の使用により環境負荷の低減を図る

場合には、品質、副産物や廃棄物の発生も十分に考慮する必要がある。

そのほか、副産物を利用したスラグ骨材などが利用されている。高炉水砕スラグの場合と同様にインベントリデータは十分には公開されていない。鉄鋼関連の副産物に対する環境負荷の配分の動向など、今後も注視が必要である。

#### (5) 水

浄水場を経由する飲料水や工業用水についてインベントリデータが報告されているが、報告により値が異なる。また、工場毎に地下水を汲み上げて使用する場合には各工場で算定する必要がある。今後、これらの値の選定や計算の方法について検討を加えていく必要がある。

#### (6) 鉄筋・鋼材

鉄筋をはじめコンクリートセクターで使用する鋼材は電炉鋼である場合が少なくない。電炉鋼は鉄スクラップを主原料とするため、鉄鉱石と石炭から製造を開始する転炉鋼に比較してエネルギー消費や環境負荷を小さく計算することも可能である。しかしながら、鉄スクラップの起源は転炉鋼であり、バウンダリーの設定は容易ではない。また、中間製品として粗鋼と副生ガスが生産される。中間製品として扱う場合には環境負荷はそれぞれに分配される。一方、種々存在する最終製品を統合した換算指標として“粗鋼”が用いられることがある。副生ガスは粗鋼を加工する場合に利用されることが多く、最終製品の代替指標としての粗鋼は副生ガスに関わる環境負荷を含む。このような状況から、種々のインベントリデータが報告され、混乱が生じ易くなっている。データの使用に際しては十分な注意が必要である。

#### (7) 型枠

型枠の報告例は少なく、主に合板のデータが公表されている。輸入材を利用する場合、乾燥や接着の工程を含む場合、焼却時のCO<sub>2</sub>排出を含む場合などデータによりバウンダリーが大きく異なるので利用には注意が必要である。また、鋼製型枠についてはインベントリデータが確認できなかった。鋼板のデータを利用して算出することになるが、前述のように鋼製品の取り扱いについては注意が必要である。

### 3.3 コンクリートの製造

種々のインベントリが報告されている。本研究委員会では全国生コンクリート工業組合連合会の会員会社にアンケートを行い、インベントリデータを整理した。

### 3.4 コンクリート製品

コンクリート製品のインベントリデータはアンケート調査に基づき算出した。関連する団体が複数あるが、プレハブ建築協会、PC建設業協会を対象とした。

製品種別毎の算出はできなかったため、用途について建

築、土木の別を踏まえて整理した。

### 3.5 コンクリート構造物の施工

土木構造物について、既往の評価事例から構造物の種類ごとにインベントリデータの整理を試みた。また、建築物については建築業協会により、構造物の構造や用途に応じて体系的にインベントリデータの整理が進められており、これを整理した。PC構造物では橋梁上部工を事例にインベントリデータを整理した。また、上部工の仕様は下部工の仕様に強く反映されるため、下部工を考慮した場合についても検討した。

これらのデータは目安として重要であるが、コンクリート構造物は“単品生産”されることが多いため、それぞれの事情に合わせて適用を検討しなければならない。

### 3.6 コンクリート構造物の維持管理

維持管理は対象とする構造物や環境、適用する工法により材料、施工とも非常に多岐にわたる。橋梁構造物を例に、予防保全、補修、解体・架け替えの場合について検討し、インベントリデータの適用事例として示した。

### 3.7 コンクリート構造物の解体・廃棄

解体工事は構造物の種類や規模により異なる。複数棟からなる集合住宅の解体工事を例としてインベントリデータを算出した。

コンクリート塊の中間処理と最終処分について、処理、処分を行っている業者にアンケート調査を行い、インベントリデータを算出した。中間処理においては生産する再生材の品目を併記した。最終処分では場内の造成作業を伴う場合があり、インベントリデータに幅がみられた。調査は全国の業者を対象としたが、回答数は十分ではなく、今後も継続した調査が望まれる。

### 3.8 インベントリデータの活用のために

既往の報告や、本委員会で実施したアンケート調査の結果を基にコンクリートセクターに関わるインベントリデータを整理した。当該セクターが環境負荷の低減に向けて活動するために基礎データとして重要である。一方で、詳細なデータが存在しないあるいは開示できない、バウンダリーが不明瞭あるいは統一されていないなどの問題点も指摘された。欠落や重複のないデータを用いて公平性、透明性のある環境評価を行うことが重要である。そのためには、業界間のバウンダリーの調整や、データ取得やその手順を標準化した規格・規準類の整備等を進める必要がある。

なお、本報告に示すようにインベントリデータの適用にあたっては種々の注意が必要である。本紙幅では、これらの事項を十分に記載できないため、個々の数値を採録していない。具体的な数値については委員会報告を参照されたい。

#### 4. 低炭素・資源循環を可能とする技術の組み合わせ（ポートフォリオ）と求められる社会システム

##### 4.1 低炭素および資源循環に向けた社会的背景

###### (1) コンクリートセクターにおける環境配慮

コンクリートセクターは、原材料、生コンクリート、PC 製品などの製造者、構造物の施工者、使用者、解体・処理・処分業者など、多くの関係者が存在する。各関係者が自らの生産行為の範囲においてCO<sub>2</sub>排出量および廃棄物発生量の最小化を行うとともに、設計段階において環境配慮した製品や工事方法などの選択を行うことによって、コンクリートセクター全体での環境負荷を低減することが可能となる。

日本建築学会では、「鉄筋コンクリート造建築物の環境配慮施工指針（案）・同解説」を刊行し<sup>9)</sup>、その中にはコンクリートセクターにおける各種の環境配慮が例示されている。これらの環境配慮は、環境負荷の低減効果が確かにあることは理解できるものの、必ずしも量化されておらず、例えば2050年におけるCO<sub>2</sub>削減率の目標値を定めることはできていない。よって、環境負荷の削減技術については、要素ごとに可能な限り量化を試みる事が重要と考えられる。

###### (2) ポートフォリオと今後の動向

各種の統計数量から、コンクリートセクターに関わる各種原材料の現状の物量は、1990年比でおよそ40～50%減、2000年比でおよそ20～30%減、2005年比でおよそ10～20%減と推計される。地球温暖化物質・廃棄物の最小化を単に過去との比較において物量のみから考えれば、極めて貢献しているといえよう。しかし、この推移がコンクリートセクターにとって好ましいことではないことは言うまでもない。コンクリートセクターに関わる物量は、今後、現状維持あるいは漸減で推移していくものと推察される。したがって、コンクリートセクターに関わる地球温暖化物質・廃棄物に関しては、何もしなくても総量の漸減が見込まれることになるが、一方で、持続可能な開発を進めるためにコンクリートセクターのさらなる成長を期待すれば、より積極的な対応のもとで地球温暖化物質・廃棄物の減少に取り組むことが必要となってくる。すなわち、数値的には、各種の総量としての減少、最小化を果たすのみではなく、地球温暖化物質・廃棄物に関わる各種の原単位の最小化を目指していかなければならない。前述のとおり、総量の増減は景気や社会情勢によって大きく左右され、コンクリートセクターに関わる技術者によっては動かしがたい数値である。一方で、原単位は、景気や社会情勢によって大きく変動するものではなく、コンクリートに関わる技術者が果たす技術開発の結果として低減を図ることのできる数値である。そのため、地球温暖化物質・廃棄物の最小

化の本質は、各種の原単位の最小化を図ることにあるといえる。

###### (3) 社会システムおよび施策の現状

低炭素化社会に向けた取り組みとして、国は、京都議定書目標達成計画に規定された対策・施策について、各分野において全力で取り組むことにより、森林吸収量の目標である1300万炭素トン（基準年総排出量比3.8%）の確保、京都メカニズムの活用（同比1.6%）と併せて、京都議定書第一約束期間の目標を達成することとしている。この京都議定書における6%削減約束を確実に達成していくために、目標の達成状況、個別の対策・施策の進捗状況について、各種データの整備・収集を図りながら点検し、順次計画を改定して対策・施策の追加・強化を行うこととしている<sup>9)</sup>。

資源循環型社会に向けた取り組みとして、国は、循環型社会の形成に関する施策を推進するため、平成15年3月に循環型社会基本計画を策定している。この計画では、物質フロー指標に関する目標および取組指標に関する目標の達成や、持続可能な社会の実現に向け循環型社会・低炭素化社会や自然共生社会と統合して、循環型社会の形成を国内外に問わず実現することなど、国際的な循環型社会の構築へ向けた取り組みを総合的に進めている。なお、上記指標の現状を踏まえ、平成20年3月に第2次循環型社会基本計画が策定され、化石系資源に関する資源生産性やバイオマス系資源投入率などについて重点的に推移をモニターしていくこととしている。

#### 4.2 設計段階

##### (1) 混和材利用

現在国内で販売・使用されている混合セメントの97%は高炉セメントB種である。公共工事では、グリーン購入法に基づく特定調達品目として、高炉セメントの調達を積極的に推進することが求められている。今後の高炉セメントの普及拡大に向けた条件を設定し、その推計値が現状の値に対してどの程度のCO<sub>2</sub>排出量の削減割合になるかを検討した。推計は、養生期間が長くなることによる影響の小さい部位、メリットを活かせる部位に高炉セメントB種を積極的に使用するとしたケース、上記に加え高炉セメントA種を普通ポルトランドセメントの代替として積極的に使用するケースの2ケースについて行った。条件設定等の詳細は割愛するが、上の2ケースに関し、それぞれ9%、14%の削減が可能となる結果となった。これらの実現のためには、社会システムとして、1)混合セメントあるいは混和材利用のメリットを活かした適所での活用促進、2)ひび割れメカニズムの解明と対策検討、3)長期養生に関する受容体制の促進、4)建築分野への混合セメントあるいは混和材適用可能性に関する検討、5)混合セメントあるいは混和材使用に向けた建

設工事受発注者等の動機付け、6)新たな混合セメントの開発促進,等が求められる。

### (2) 再生材利用

国土交通省が平成 12 年度に実施した実態調査に基づき試算した廃棄物排出量の将来予測では、コンクリート塊は平成 12 年度の 3.5 千万 t から平成 32 年度には 5.0 千万 t に増加すると推定している。国土交通省がコンクリート塊に関して示した今後の方向性によると、再生コンクリートなどリサイクル用途の拡大により現状の再資源化率 (98%) を維持していく方針である。コンクリート塊リサイクルの課題としては微量成分の溶出が挙げられ、再生骨材のようにコンクリート中に封じ込めて固めてしまえば溶出はほとんどないと思われるが、路盤材のように土に接する利用を行うと、溶出した場合、自然環境に影響を及ぼすことが懸念される。

### (3) 長寿命化

我が国における住宅の寿命は約 30 年といわれ、英国の 77 年や米国の 55 年と比べて著しく短い。RC3 階建てのマンション (延床面積 1,440m<sup>2</sup>) の場合で約 2.6t/m<sup>2</sup>, SRC8 階建て (延床面積 2,400m<sup>2</sup>) の場合で約 2.1t/m<sup>2</sup> のコンクリートが投入されている。そして、住宅の寿命が 3 倍となった場合、RC 造の中層住宅で約 1.7t/m<sup>2</sup>, SRC 造の中高層住宅で約 1.4t/m<sup>2</sup> のコンクリート投入量が削減されることになる。また、住宅におけるエネルギー消費量をライフサイクル全体 (計算期間 25 年) でみれば、使用段階が約 75% と非常に大きいことは周知のとおりであるが、部材製造・施工段階のエネルギー消費量は使用段階の 5 年分以上にも相当し、ライフサイクルが短いほどその比率が大きくなることから、長寿命化の効果が如実に表れるともいえる。

社会基盤施設においても、構造物を長寿命化することによって得られる CO<sub>2</sub> 削減効果が大きいことは、詳細な検討を行うまでもなく容易に想像できる。土木学会 216 委員会の報告書<sup>7)</sup>を参考に試算すると、高耐久な構造物に関して、当時と同等の品質が得られると想定される高品位コンクリートを使用して現在の施工を行った場合と、現在の標準的な材料を使用して現在の施工を行った場合とでは、更新に至るまでの期間がそれぞれ 197 年と 41.8 年となり約 5 倍もの寿命の差がある。高耐久化すなわち長寿命化することの効果が絶大であることが容易に想像できる。

## 4.3 原材料製造段階

### (1) セメント

セメント中のカルシウム源を主に石灰石に求める場合、非エネルギー由来の CO<sub>2</sub> を削減するためには、セメントクリンカーの生産量を減らすことしか選択肢はない。しかし、セメント製造業は、他産業からの副産物や

廃棄物を燃料および原料に使用するという、産業構造全体の静脈としての役割を担っている。そのため、大幅な減産は、廃棄物最小化の面では問題を生じさせる可能性を含む。一方、エネルギー由来の CO<sub>2</sub> について、装置や製造システムの面では、現状技術で省エネルギー化がほぼ限界に達しているものと推察される。NEDO の事業として、セメントのカルシウム源として石灰石の代わりにコンクリートリサイクル材料を中心に用いる検討や、セメントクリンカーの低温焼成技術についての事前研究が実施され始めており、非エネルギー由来、エネルギー由来の CO<sub>2</sub> 削減をもたらすものとして期待される。

セメント製造業を低炭素化および廃棄物の最小化の面で適切に評価するためには、セメント製造における他産業のものも含む廃棄物量の最小化に対する貢献度の評価システムが必要であると思われる。そのためには、CO<sub>2</sub> 排出量と廃棄物の最小化を評価できる統合指標の開発が必須である。

### (2) 骨材

骨材に関わる CO<sub>2</sub> 排出では、製造時の燃料消費に伴う CO<sub>2</sub> 排出よりも骨材の輸送に伴う CO<sub>2</sub> 排出の影響が甚大であるといえる。骨材の採掘地とコンクリートの原料として消費される需要地が隣接していないことが多いためである。資源の観点では、他産業分野で余剰となっている産業廃棄物系骨材が数多くある。これらを積極的に取り込むことは、建設業以外で発生する産業副産物を有効利用する観点に加え、コンクリート自体に必要な天然資源を節約するという観点からも重要となる。現在の混合化骨材のように、適切な組合せを選定することで、産業廃棄物系骨材の利用量を増加させられる仕組みを築く必要があるといえる。

### (3) 鉄筋

コンクリートセクターで一般に使用されている鉄筋 (棒鋼) はほとんど電炉鋼であり、これらが高炉生産された場合と比較し、年間あたり約 1,500 万 t の CO<sub>2</sub> 削減効果となる。その意味合いでは、現在流通している鉄筋は、すでに環境配慮がなされているといえる。

コンクリート補強材として、さらなる環境負荷の低減を図るためには新しい材料の開発が望まれ、機械式定着工法によって高密度配筋における主筋やせん断補強筋の定着筋量を削減する方法<sup>8)</sup>はその一つとなる。土木・建築構造物における試算事例では、全体の 2~10% の鉄筋量を削減できる効果がある。また、この工法では配筋施工が合理化されるため工期を短縮することができ、施工の面でも CO<sub>2</sub> 排出量を抑える効果が期待できる。

## 4.4 コンクリート製造段階

コンクリートの製造に伴う CO<sub>2</sub> 排出は、1.0 kg-CO<sub>2</sub>/t 程度といわれている。低炭素化社会を指向する方向のも

とでは、さらなる合理化を目指す余地はあるものと考えられるが、製造に伴うCO<sub>2</sub>排出状況は、プラントごとの個別性が高く、特に、規模の小さいプラントの努力にどこまで期待できるかが課題である。製造プラントの稼働エネルギー削減の可能性として、昼休み時にプラントを完全に停止させれば、待機時の負荷電力の削減はできると考えられるが、1日の平均的な電力量である約1,600kWhに対して50kW程度と全体からみればその効果はわずかである。運搬用重機や車両に消費される軽油使用量の削減方法として、アジテータ車のアイドリングストップやGPSを利用した配車システムがコンクリート製造工場採用され始めている。また、一部のアジテータ車では、現場での出荷待ちの攪拌を電動モーターで行うことにより、軽油使用量の削減に役立っている例がある。今後さらに搬送用車両のハイブリッド化が進めば、全般的に軽油使用量が削減されると考えられるが、導入にはコストを要するため、一般車両で導入されているような減税措置や補助金等の仕組みは必須であると考えられる。

生コン工場から排出される廃棄物または関連して生じる廃棄物には、主として、残コン・戻りコンに起因して生じるスラッジケーキ、コンクリートがらなどが考えられる。残コン・戻りコンの発生量は、近年の生コン生産量を1億m<sup>3</sup>と仮定すると、年間200~300万m<sup>3</sup>となる。残コン・戻りコンの削減には、各種削減技術の開発・普及などに加え、法体系の整備やレディーミクストコンクリートの取引体系の整備などが望まれている。

#### 4.5 建設段階

建設機械の稼働により発生するCO<sub>2</sub>量は、建設段階で直接排出されるCO<sub>2</sub>量の多くを占めると考えられる。国土交通省の「低燃費型建設機械指定制度」では、特にパワーショベル、ブルドーザ、ホイールローダの主要3機種を重点化し、メーカー各社の建設機械の低燃費化の技術開発を促進している。さらに、国土交通省HPの中で「CO<sub>2</sub>排出低減建設機械一覧」を紹介しており、パワーショベルやホイールローダなどでも、ハイブリッドの技術等を取り入れることで、旧式の製品に対し、20~30%の燃料削減に成功しているようである。また、比較的小型の重機では電気式のものも開発されており、CO<sub>2</sub>排出量の削減だけでなく、排気ガスや騒音といった環境負荷の低減にも貢献している。一方、生コン車に省燃費運転支援機器を取り付け省燃費運転に必要な指示を運転者に伝達されることで平均14%の燃料の削減が達成できた例やパワーショベルにオートアイドリングストップ機能を付けたことで約20%の燃料を削減できた例などがあり、省燃費運転を徹底することで、10%程度のCO<sub>2</sub>排出量の削減につながるのではないかと期待される。

#### 4.6 供用段階

RC造建築物のライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量に占める供用段階の割合は、一般に大きいことがいわれており、供用年数が増えるにつれてその割合は当然大きくなる。ある試算では、RC造事務所建築物の運用時において、およそ40kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>・年のCO<sub>2</sub>排出量となるとしている<sup>9)</sup>。建築物の運用に起因するCO<sub>2</sub>排出量の低減を図る方法として、コンクリート躯体の蓄熱性能を積極的に活用する方法がある。海外の試算例であるが、組石造の住宅(2階建て、2LDKタイプ)の場合、コンクリートの蓄熱に期待しない仕様と比較して、60年間の供用時点でCO<sub>2</sub>総排出量を9~15t削減できる結果が得られている<sup>10)</sup>。また、RC造事務所建築物供用期間を70年以上と仮定した場合、修繕・改修によるCO<sub>2</sub>排出量がライフサイクルに占める割合は2~3割と、比較的大きい割合を示す試算結果が得られており<sup>9)</sup>、修繕・改修に係るCO<sub>2</sub>排出量の低減を図ることも重要である。

#### 4.7 解体・処理段階

解体段階での重機使用によるCO<sub>2</sub>排出量はおよそ29.0kg-CO<sub>2</sub>/tであるが、重機がハイブリッド化すれば、25%程度削減できる可能性がある。運搬段階でのCO<sub>2</sub>排出量は、輸送原単位の取り方により値が異なるが、改正省エネ法による燃費改善が実施されれば、30%のCO<sub>2</sub>排出量削減が可能となる。コンクリート塊中間処理におけるCO<sub>2</sub>排出原単位はほぼ2.5~3.0kg-CO<sub>2</sub>/t程度であるが、その内訳では、重機利用が約2/3を占めるので、重機の燃費が上述のように25%程度改善されれば、約1/6(17%)の効率改善に寄与することになる。一方、骨材回収のCO<sub>2</sub>排出原単位は加熱の有無で大きく異なるが、機械的な粉碎のみであれば通常のコンクリート塊中間処理の1.5倍程度、加熱擦り揉みであれば15倍程度といわれている。

エネルギー源の低炭素化が進めば、解体や運搬でのCO<sub>2</sub>排出量はさらに低減可能であるが、問題は発生するコンクリート塊の膨大さであろう。現在、再生骨材に対するJIS化も行われ、技術も一段落しているのに市場化が進まない理由はコストと副産微粉の扱いである。

#### 4.8 プレキャストコンクリート

12階建て120戸の集合住宅をプレキャスト化工法(壁式ラーメン構造)と在来工法により設計・施工した場合のそれぞれのCO<sub>2</sub>排出量を試算した事例<sup>11)</sup>では、プレキャスト化工法は、在来工法に比べて耐用年数を長く設定でき年間CO<sub>2</sub>排出量は小さくなるものの、LCCO<sub>2</sub>総量では必ずしもプレキャスト化工法の方がCO<sub>2</sub>排出量が少ないとは言えない。しかし、輸送段階におけるCO<sub>2</sub>排出量は、在来工法に比べてプレキャスト化工法では約2割程度の削減ができ、トータルとしてプレキャスト化工法の採用により、LCCO<sub>2</sub>総量は削減することが可能であると

判断される。プレキャスト化工法の採用の判断においては、CO<sub>2</sub>排出に関するこれらのプレキャスト化工法の特徴を考慮することが今後重要になると考えられる。

#### 4.9 ライフサイクルで見たポートフォリオ

コンクリートのライフサイクルの各ステージでは、地球温暖化物質・廃棄物の原単位を最小化する技術がそのステージの総量を最小化する技術となるが、各ステージを総和したライフサイクルでは、地球温暖化物質・廃棄物の総量を最小化する技術が必要となってくる。これは各要素技術の組合せ（ポートフォリオ）となるが、ライフサイクルでの総量の中で各ステージの占める割合が大きく異なることから、総量に関しては最小化のための支配的なステージが存在することとなる。このステージは、土木構造物と建築物で異なることが考えられる。すなわち、土木構造物の場合には、原材料製造段階が大きなウェイトを占めるであろうが、建築物の場合には、原材料製造段階か供用段階が大きなウェイトを占めることになるであろう。いずれにせよ、ここで紹介した各ステージの要素技術は、いずれも十分に組み合わせで適用が可能な技術であると思われる。特に、すべてのステージに共通して関わる動力源のハイブリッド化などは、推進されることで全てのステージのCO<sub>2</sub>排出量削減を可能とすることから、施策面での推進が望まれるところである。

#### 4.10 低炭素社会および資源循環型社会に向けたコンクリートセクターの課題

従来の生産活動からの転換を迫られていることへのコンクリートセクターの認識は、低炭素社会や資源循環型社会に向けたさまざまな取り組みが、各ライフサイクルステージにおいて実施されつつあるCO<sub>2</sub>排出削減技術などの例をみれば明らかである。しかし、さまざまな技術開発が行われているものの、それらが広く使われる状況にはない。よって、これらを普及させていくための施策を考え、導入していく必要がある。

また、仮に現在ある技術が広く普及し、さらにこれらを効率的に組み合わせたととしても、現在排出されているCO<sub>2</sub>排出量を半減させるような大幅な削減が可能になるとは言い難い。よって、現状の技術あるいは商習慣などあらゆる面で今までにない発想から、すなわち革新的な技術や社会システムが必要になると考えられる。当然、それらの導入は現状の社会システムのなかで問題を生じさせることも想定され、社会・組織・人が円滑に新たな社会を形成できるような施策を考えていくことが重要である。また、そのためにはコンクリートセクターに限らず、低炭素社会あるいは資源循環型社会を目指すことが、社会全体で認識が共有され、進むべき方向に対する合意も必要となろう。

## 5. 委員会提言

IPCC 第4次評価報告書<sup>12)</sup>は、気候システムの温暖化には疑う余地がないことを指摘し、CO<sub>2</sub>濃度と気温上昇のシナリオを明示的に示した。その後、これらのシナリオに基づいてCO<sub>2</sub>削減目標についての議論が行われており、日本政府は2008年に「低炭素社会づくり行動計画」を示し、2050年までに60~80%のCO<sub>2</sub>削減を目指すこととした。また、2010年3月に閣議決定した地球温暖化対策基本法案には、2020年までに1990年比25%削減することが明示された。

このような状況の中で、CO<sub>2</sub>削減に向けた施策には2つの指標の導入が考えられる。つまり、総量削減と原単位削減である。どちらを優先するかは、国・地域の状況および対象によって異なってくるが、何れもCO<sub>2</sub>削減に向けた評価指標として有効である。一方、我が国のコンクリート・建設産業におけるCO<sub>2</sub>排出量は建設投資の急激な減少により、その絶対量は自然減となっていると思われる。しかし、さらに先の将来を考えれば、これ以上の削減は必要ないとはいえず、現状からの削減を目指すべきである。これは、CO<sub>2</sub>削減努力が革新的な技術開発に直結するからである。すなわち、革新的な技術開発は新たな需要創造を導き、結果としてコンクリート・建設産業の持続的発展をもたらすと考えられる。

また、コンクリート系廃棄物は、現在そのほとんどが道路路盤材等に有効利用されている。しかし、道路建設の縮小によりその需給関係のバランスが崩れつつあることが顕在化してきた。これまで蓄積してきた膨大なストックの将来を考えると、コンクリート系廃棄物の処理戦略は極めて重要な課題となる。

以上のことを考慮し、また本委員会により行った調査・研究に基づいて、低炭素・資源循環を目指すためにコンクリートセクターは以下のことを行うよう提言する。

- 1) コンクリートセクターに属する組織・企業等は、CO<sub>2</sub>排出量および廃棄物の削減に向けた行動計画を作成し、これを実行する。
- 2) CO<sub>2</sub>排出量および廃棄物の削減に関する評価指標・ツールを開発し、環境性能を評価する。
- 3) CO<sub>2</sub>排出量および廃棄物の削減に関し、2020年および2050年におけるコンクリートセクターとしての目標値を定め、これを達成するための技術開発・システム構築を促進し、それらの普及に努める。
- 4) CO<sub>2</sub>排出量および廃棄物の削減を実現するための行動ができる人材を育成する。

## 6. あとがき

本研究委員会は、3年間継続して2008年に終了した「コ

ンクリート構造物の環境性能に関する研究委員会」の後、更に2年間、温暖化と廃棄物に焦点を絞って調査研究活動を行ったものである。この5年間で、状況は著しく変化した。つまり、CO<sub>2</sub>削減あるいはサステナビリティの社会的認知は著しく高まったと言える。これは、世界の人口増加と発展途上国の急激な経済発展により、地球規模の資源・エネルギーと温暖化の問題が人類にとって極めて危機的であることが明らかになってきたことによる。世界のコンクリートセクターにおける材料製造から解体・再生までのCO<sub>2</sub>排出量は控えめに見積もって48億トン程度と類推される。この値は、2007年における化石起源のCO<sub>2</sub>排出量290億トンの16.5%に相当する。将来、これが2倍以上になることは確実である。従って、コンクリートセクターに対するCO<sub>2</sub>削減圧力は極めて大きなものになることが予想される。また、コンクリート系廃棄物の低環境負荷処理による完全再利用要求も必然である。コンクリートセクターがこれらの要求に応えることができなければ、徐々にコンクリートの重要性が低下する可能性がある。これまで、コンクリートセクターが本気でこれらの問題に取り組んできたとは言いがたい。しかし、機は熟したと言える。コンクリートセクターは、これらの問題に総力で取り組む意志を示すべきである。コンクリートセクターが、今後もその社会的役割を果たし、更に発展して行くために。

最後に、2年間にわたって本研究委員会を支えていただいた委員各位、ならびにアンケート調査等にご協力頂いた方々に深甚の謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 環境省：日本の物質フロー2006, <[http://www.env.go.jp/recycle/circul/mate\\_flow/mate\\_flow.pdf](http://www.env.go.jp/recycle/circul/mate_flow/mate_flow.pdf)>より入手
- 2) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグ統計年報（平成20年度実績），2009.8
- 3) 国土交通省総合政策局情報安全・調査課建設統計室 監修：建築統計年報－平成19年度計・19年計－（平成20年版），建設物価調査会，2009.1
- 4) プレストレスト・コンクリート建設業協会：Prestressed Concrete Year Book
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の環境配慮施工指針（案）・同解説，2008.9
- 6) 環境省：環境白書（平成21年度版），2009.7
- 7) 土木学会：歴代構造物品質評価／品質検査制度研究小委員会（216委員会）成果報告書およびシンポジウム講演概要集，コンクリート技術シリーズ87，2009.11
- 8) 土木学会：鉄筋定着・継手指針 [2007年版]，コンクリートライブラリー，2007
- 9) 漆崎昇，水野稔，下田吉之，酒井寛二：長寿命化対策のライフサイクル資源使用量と二酸化炭素排出量に与える影響，日本建築学会計画系論文集，第561号，pp.85-92，2002.11
- 10) The Concrete Centre：<<http://www.concretecentre.com/pdf/CQAutumn06%20Extract.pdf>>より入手
- 11) プレハブ建築協会：PC工法環境性能ガイド
- 12) IPCC：Climate change, Synthesis report, Summary for policymakers, 2007